

Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), "Tecnología de la energía eólica", *Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE)*, México, [s. f.].

Introducción

Históricamente las primeras aplicaciones de la energía eólica fueron la impulsión de navíos, la molienda de granos y el bombeo de agua, y sólo hasta finales del siglo pasado la generación de energía eléctrica. Actualmente las turbinas eólicas convierten la energía cinética del viento en electricidad por medio de las aspas o hélices que hacen girar un eje central conectado, a través de una serie de engranajes (la transmisión) a un generador eléctrico.

En lo que respecta a capacidad instalada, para finales de 1997 a nivel mundial se tenían instalados alrededor de 7700 MW. En México se cuenta con la central eólica de la Ventosa en Oaxaca, operada por CFE, con una capacidad instalada de 1.5 MW y una capacidad adicional en aerogeneradores y aerobombas, según el Balance nacional de energía de 1997, de alrededor de 2.4 MW.



(Foto:NREL)

Existen varias ventajas competitivas de la energía eólica con respecto a otras opciones, como son:

- Se reduce la dependencia de combustibles fósiles.
- Los niveles de emisiones contaminantes, asociados al consumo de combustibles fósiles se reducen en forma proporcional a la generación con energía eólica.
- Las tecnologías de la energía eólica se encuentran desarrolladas para competir con otras fuentes energéticas.
- El tiempo de construcción es menor con respecto a otras opciones energéticas.
- Al ser plantas modulares, son convenientes cuando se requiere tiempo de respuesta de crecimiento rápido.

La investigación y desarrollo de nuevos diseños y materiales para aplicaciones en aerogeneradores eólicos, hacen de esta tecnología una de las más dinámicas, por lo cual constantemente están saliendo al mercado nuevos productos más eficientes con mayor capacidad y confiabilidad.



Aplicaciones y Tecnologías.

Un sistema conversor de energía eólica se compone de tres partes principales: (i) el rotor, que convierte la energía cinética del viento en un movimiento rotatorio en la flecha principal del sistema; (ii) un sistema de transmisión, que acopla esta potencia mecánica de rotación de acuerdo con el tipo de aplicación. Aplicación para cada caso, es decir, si se trata de bombeo de agua el sistema se denomina aerobomba, si acciona un dispositivo mecánico se denomina aeromotor y si se trata de un generador eléctrico se denomina aerogenerador.

El rotor puede ser de eje horizontal o vertical, éste recupera, como máximo teórico, el 60% de la energía cinética del flujo de viento que lo acciona. Esta formado por las aspas y la maza central en donde se fijan éstas y se unen a la flecha principal; el rotor puede tener una o más aspas. Un rotor pequeño, de dos aspas, trabaja a 900 revoluciones por minuto (rpm), en tanto que uno grande, de tres aspas y 56 metros de diámetro, lo hace a 32 rpm. El rotor

horizontal de tres aspas es el más usado en los aerogeneradores de potencia, para producir electricidad trifásica conectada a los sistemas eléctricos de las empresas suministradoras.

La transmisión puede consistir en un mecanismo para convertir el movimiento rotatorio de la flecha en un movimiento recíprocante para accionar las bombas de émbolo de las aerobombas, que en el campo se utilizan para suministrar agua a los abrevaderos del ganado o a las viviendas. Para la generación de electricidad normalmente se utiliza una caja de engranes para aumentar las revoluciones a 900, 1,200 ó 1,800 rpm, para obtener corriente alterna trifásica de 60 ciclos por segundo.

En la actualidad, la generación de electricidad es la aplicación más importante de este tipo de sistemas. Los aerogeneradores comerciales alcanzan desde 500 hasta 1,000 kW de potencia nominal, tienen rotores de entre 40 y 60 m de diámetro y giran con velocidades que van de las 60 a las 30 rpm. Los generadores eléctricos pueden ser asíncronos o síncronos, operando a una velocidad y frecuencia constante, que en México es de 60 Hz. En el caso de aerogeneradores con potencias inferiores a los 50 kW también se utilizan generadores de imanes permanentes, que trabajan a menor velocidad angular (de entre 200 y 300 rpm), que no necesitan caja de engranes y que, accionándose a velocidad variable, pueden recuperar mayor energía del viento a menor costo.

Un sistema conversor de energía eólica es tan bueno como su sistema de control. La fuerza que ejerce el viento sobre la superficie en que incide es función del cuadrado de la velocidad de éste. Rachas de más de 20 metros por segundo, que equivalen a más de 70 km/hora, pueden derribar una barda o un anuncio espectacular, e incluso dañar un aerogenerador si éste no está bien diseñado o su sistema de control está fallando.

En los aerogeneradores de potencia, el sistema de control lo constituye un microprocesador que analiza y evalúa las condiciones de operación considerando rumbo y velocidad del viento; turbulencia y rachas; temperaturas en el generador, en la caja de transmisión y en los baleros de la flecha principal. Además, muestrea la presión y la temperatura de los sistemas hidráulicos de los frenos mecánicos de disco en la flecha; sus rpm, así como los voltajes y corrientes de salida del generador. Detecta vibraciones indebidas en el sistema,

optando por las mejores condiciones para arrancar, parar, orientar el sistema al viento y enviar señales al operador de la central eoloelectrica sobre la operación del mismo.

La torre que soporta al aerogenerador de eje horizontal es importante, ya que la potencia del viento es función del cubo de su velocidad y el viento sopla más fuerte entre mayor es la distancia más alto del suelo; por ello, el eje del rotor se sitúa por lo menos a 10 metros en aerogeneradores pequeños y hasta 50 o 60 metros del suelo, en las máquinas de 1000 kW. En un aerogenerador de 500 kW son típicas las torres de 40 metros, y estas pueden ser de dos tipos: La tubular, recomendada en áreas costeras, húmedas y salinas, y la estructural o reticular, propia de regiones secas y poca contaminación atmosférica, por ser más baratas y fáciles de levantar.



Tecnologías de aprovechamiento.

A partir de las diversas experiencias internacionales de operación de grandes conjuntos de aerogeneradores modernos, constituyendo centrales eoloelectricas, de 1980 a 1995 se evolucionó de la máquina de 50 kW a la de 500 kW, estando actualmente en proceso de introducción las unidades de 750 y 1000 kW, las que se consideran el tope para este tipo de arquitectura y tecnologías actuales de grandes aerogeneradores.

La tecnología de materiales alrededor de los materiales compuestos, que permitan estructuras más esbeltas y ligeras, más resistentes a la oxidación y la corrosión, y más fuertes a la vez, así como de supermagnetos en los generadores, permitirán desarrollar nuevos conceptos más confiables y económicos, desde unidades de decenas de Watts hasta grandes aerogeneradores de potencia, trabajando en régimen de velocidad variable, aprovechando mejor la energía del viento y constituyendo junto con la energía hidroeléctrica, el soporte principal de la generación eléctrica en los sistemas nacionales. Para fines del año 2000 se esperan están instalados en el mundo, más de 14,000 MW. En Europa, Alemania, Dinamarca, el Reino Unido, España y Grecia tienen los programas más ambiciosos. En España, la empresa eléctrica de la Provincia de Navarra tiene planeada la instalación de 54 Centrales eoloelectricas y espera producir más del 50% de la energía que distribuye. La empresa eléctrica de la Provincia de Euskadi (País Vasco) también prevé un

desarrollo importante, lo que ha ocasionado, paradójicamente, que grupos ecologistas protesten por lo que consideran excesivo.

Para el año 2020, la Asociación Europea de Energía Eólica, estima tener más de 20,000 MW instalados de potencia eólica para generación de electricidad. China y la India son dos países que han decidido dar un impulso grande a esta forma de generación eléctrica, para lo cual se han asociado con empresas europeas para fabricar en esos países el equipamiento requerido. En América Latina, Costa Rica y Argentina llevan la delantera, con 20 y 9 MW respectivamente. En Argentina son las empresas eléctricas cooperativas de la Patagonia las que han dado el impulso, amén de que las leyes estatales de la Provincia de Chubut, obligan a un 10% de la generación eléctrica con energía eólica. México tiene una central de 1,575 kW en la Venta, Oaxaca, con planes de ampliarla a 54 MW. Nicaragua también tiene planes de instalar una central eólica de al menos 30 MW. En el Caribe, la empresa eléctrica de Curazao opera desde marzo de 1994 una centralita de 4 MW que fue la primera eoloeléctrica en América Latina y el Caribe.

En México, el desarrollo de la tecnología de conversión de energía eólica a electricidad, se inició con un programa de aprovechamiento de la energía eólica en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en febrero de 1977, cuando la Gerencia General de Operación de Comisión Federal de Electricidad, cedió al IIE la Estación Experimental Eoloeléctrica de El Gavillero, en las cercanías de Huichapan, Hidalgo, donde se pretendía energetizar el ejido ya electrificado y con servicio, a partir de una microcentral eólica, integrada por dos aerogeneradores australianos Dunlite de 2 kW cada uno, un banco de baterías, y un inversor de 6 kW para alimentar la red de distribución del poblado. El inversor, construido por personal de CFE, fallaba arriba de los dos kW de demanda por problemas de calidad de componentes, por lo que físicamente no pudo realizarse el experimento, sin embargo, estando instrumentado el sitio, se tenían los promedios horarios de velocidad del viento y conociéndose las características de respuesta de los aerogeneradores era posible estimar numéricamente la energía que podría suministrarse al ejido. El régimen de vientos del lugar producía exceso de energía en verano y déficit en invierno para el consumo normal del poblado.

La Estación Experimental de El Gavillero se habilitó como centro de prueba de pequeños aerogeneradores y en ella se construyó además un simulador de pozo de agua para la prueba y caracterización de Aerobombas. La Estación estuvo en operación hasta 1996 en que fue desmantelada.

El IIE desarrollo y probó en El Gavillero, los siguientes prototipos de aerogeneradores:

1. De 1.5 kW, tres aspas de aluminio, con control centrífugo de ángulo de ataque.(1977-1978)
2. El Fénix, de 2 kW, eje horizontal y tres aspas fijas de lámina de hierro, y control de cola plegable.(1981-1983)
3. El Albatros I, de 10 kW, eje horizontal, 11 m de diámetro, tres aspavelas de estructura de Al y forradas de tela de dacrón de alta resistencia. (1981-1985)
4. El Albatros II, de 10 kW, eje horizontal, tres aspas de fibra de vidrio superdelgada con control por torcimiento del aspa. (1986-1987)
5. La segunda versión del Fénix, con tres aspas de fibra de vidrio. (1992-1995)
6. La Avispa, de 300 Watts, eje horizontal, tres aspas de fibra de vidrio y control por timón de

cola plegable. (1990-1995)
7. También se desarrolló una aerobomba mecánica, denominada "Itia", de eje horizontal, 5 aspas metálicas, con potencia del orden de 1/4 de HP, que bombeaba agua de pozos de hasta 50 m de profundidad. Este sistema, probado también en El Gavillero, en el simulador de pozos, fue objeto de una patente para el IIE, y aunque se concedió licencia para su fabricación y comercialización, la carencia de un mecanismo de financiamiento de riesgo compartido, la dificultad para la creación de la red de distribución y servicios, como la falta de financiamiento a los usuarios potenciales, impidió su diseminación.

Las características de los aerogeneradores y su desarrollo se describen a continuación.

En 1978, un aerogenerador de 1.5 kW con rotor horizontal de tres aspas de lámina de Aluminio, que tenían control del ángulo de ataque para regular la potencia entregada. Después de las pruebas de caracterización, que resultaron satisfactorias y corroboraban las expectativas de diseño, estando parado, frenado y con las aspas amarradas a la torre, un gran remolino lo impactó, arrancándole dos aspas y destruyéndolas. Los exámenes posteriores evidenciaron un error en los procedimientos de soldadura en atmósfera inerte, en el soporte rotatorio del mango del aspa. Dicho prototipo no fue reconstruido al evidenciarse problemas de suministro de componentes y materiales, así como del control de calidad en los procesos de fabricación.

Con la experiencia adquirida, se inició el diseño y desarrollo de un aerogenerador de 2 kW denominado Fénix -por el ave que resurge de sus propias cenizas- de tres aspas fijas de lámina de hierro, el que sometido a pruebas y mejoras, evolucionó a tres aspas de fibra de vidrio de alta eficiencia aerodinámica, generador trifásico de imanes permanentes y sistema de control a base de timón de cola plegable, que lo mismo limita la potencia que lo inhabilita para condiciones de vientos extremos. Este pequeño aerogenerador es capaz de proporcionar del orden de 250 kWh por mes, lo que permitiría energizar una vivienda rural con todos los servicios eléctricos usados responsablemente. Este aerogenerador es también objeto de trámites de patentes y su transferencia a la industria está disponible.

El Albatros I constituyó el mayor aerogenerador desarrollado en México, de 10 kW de potencia eléctrica, en base a un generador de imanes permanentes de 28 polos y rotor de tres aspas de 11 metros de diámetro, fue concebido para operar como aerobomba eléctrica, accionando en régimen de velocidad variable, una bomba eléctrica convencional, sumergida o vertical, de 7.5 a 10 HP, accionada con corriente trifásica a 220 Volts y frecuencia de 40 a 80 ciclos/segundo, dependiendo de la velocidad del viento. Del Albatros I se desarrollaron dos versiones, la aerobomba mecánica, con mecanismo de carrera variable, para optimar el aprovechamiento de la energía eólica en bombas de émbolo, y la eléctrica, trabajando en régimen de velocidad variable en la bomba, con el mismo fin, mejorar la eficiencia.

Este desarrollo se inició con el apoyo económico y asesoría de VITA (Volunteers in Technical Assistance) organización no lucrativa de divulgación técnica de los Estados Unidos para países en vías de desarrollo, que recibió financiamiento de la Fundación General Electric para este proyecto. Los trabajos posteriores en el Albatros II, y el Itia se realizaron con fondos proporcionados por el Programa Mar del Plata de la Organización de Estados Americanos (OEA). Este financiamiento en periodo de devaluaciones permitió habilitar un taller móvil y la construcción de un Túnel de Viento en la sede del IIE en Temixco, Mor.

Durante las pruebas de la versión eléctrica del Albatros I en El Gavillero, vientos enrachados estando en operación, provocaron la fractura de la estructura de aluminio de una aspavela, partiéndose a la mitad. La estructura del aspavela falló por errores en el proceso de soldadura al recalentar el larguero principal y degradar sus características de resistencia a la tracción, fracturándose con el esfuerzo. El dacrón importado, de alto costo y las dificultades constructivas de la estructura de la aspavela, llevó a reconsiderar el diseño del rotor.

El Albatros II, se desarrollo también alrededor del concepto de la vela, sin usar una tela de alta resistencia, alto costo y de importación, sino un remedo semi rígido de fibra de vidrio, en que por torsión del aspa se varían las características aerodinámicas de la misma y se controla y limita la potencia transferida al rotor. Este aerogenerador, mucho más esbelto y sencillo, funcionaba bien en sus primeras pruebas operacionales. Antes de ser instrumentado para su caracterización, ya que en la Estación de El Gavillero se probaban simultáneamente otros dos aerogeneradores, -el Fénix de 2 kW y el Colibrí de 5 kW, el único aerogenerador fabricado y comercializado en México desde principios de los 80's-, lo impactó un gran remolino, estando parado y frenado, levantando el conjunto de bastidor y rotor, de más de 600 kilos, al menos 30 centímetros para sacarlo del mecanismo de tornamesa que en la cúspide de la torre de 18 metros, permite la orientación del conjunto para darle la cara al viento cuando está en operación. La caída fue catastrófica, ya que el conjunto del rotor, de tres aspas y 11 metros de diámetro, con largueros de aluminio, fue totalmente destruido.

El IIE elaboró los anteproyectos de un aerogenerador de 50 kW y de otro de 100 kW para ser montado en las inmediaciones de la Estación de El Gavillero junto a un pozo profundo donde se instaló una bomba de 100 HP. Proyecto que careció de respaldo económico para su ejecución.

Los recortes presupuestales, obligaron a concentrarse nuevamente en pequeños aerogeneradores, desarrollándose el Avispa de 300 Watts, utilizando un alternador de automóvil, el que producido industrialmente con un generador de imanes permanentes sería nominalmente de 500 Watts. El Avispa resume la experiencia de más de una década diseñando, construyendo y probando aerogeneradores. Desde su diseño se consideraron tres criterios básicos, su confiabilidad y su reproducibilidad industrial a bajo costo. Este aerogenerador es objeto de patentes en trámite, por soluciones novedosas en los mecanismos de control y ensamble. El Avispa, equivalente ahora a seis paneles fotovoltaicos de 50 Watts pico, permitiría en una vivienda rural, energizar el alumbrado con lámparas fluorescentes compactas, el radio durante el día y una televisión en la noche, así como un pequeño refrigerador, ya que proporcionaría del orden de 50 kWh al mes, en condiciones adecuadas de viento (5 m/s de promedio anual).

En el IIE se desarrollo también un pequeño aerogenerador de 50 Watts de 90 centímetros de diámetro, cuyo objetivo inicial era la recarga de las baterías automotrices usadas en energizar los anemómetros electrónicos con los que se realizaban los estudios del viento en los sitios de interés. Los anemómetros requerían al cabo de un mes de mediciones continuas que se reemplazaran las memorias y la batería por una recién cargada. La instalación de un pequeño aerogenerador en el mástil de los anemómetros mantendría permanentemente un nivel adecuado de carga en la batería. El desarrollo de la electrónica de estado sólido, permitió diseñar anemómetros electrónicos de muy bajo consumo eléctrico, siendo suficiente un par de pilas alcalinas para sustituir la batería automotriz.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas, ha sido la única institución que por veinte años ha mantenido una ruta consistente de desarrollo de sistemas conversores de energía eólica, lo que se complementó con el desarrollo de anemocinemógrafos electrónicos, sistemas de prueba y adquisición de datos, un túnel de viento con un sistema de adquisición de datos en tiempo real, un laboratorio móvil de meteorología eólica, un taller móvil y la Estación Experimental de El Gavillero, Hgo.

Al lado de estas actividades, otras instituciones han incursionado en el desarrollo de sistemas conversores de energía eólica, como la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, que desarrolló el Ehecatl de 1 kW. El Instituto de Ingeniería de la UNAM junto con el Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur, que desarrollaron otro prototipo de 1 kW. Las Facultades de Ingeniería de la Universidad



Foto: NREL

Veracruzana y de la Universidad de Zacatecas, han realizado como trabajo de tesis, prototipos de pequeños aerogeneradores, usando alternadores automotrices.

A mediados de 1994 entró en operación en la Venta, Oaxaca, una central eolieléctrica de 1,575 kW, constituida por 7 aerogeneradores Vestas (Daneses) de 225 kW cada uno, como resultado de una licitación pública convocada por CFE. Esta central, construida en un lugar donde el IIE realizó mediciones desde 1984 y ubicó el sitio como uno de los más ventosos en el Sur del Istmo de Tehuantepec, presenta factores de planta anuales del orden del 60%,

cuando la media en Dinamarca y California es del orden del 25%. Esta minicentral representa la primera experiencia para CFE de la interconexión de eoloelectricas al sistema eléctrico interconectado.

Sistemas Híbridos Eólico-Solar.

Los sistemas híbridos son una tecnología emergente y, como tal, se encuentran en proceso de investigación; su arquitectura aún no está bien definida y por lo tanto, ni la filosofía de control ni el equipo correspondiente son tecnologías ya establecidas . El sistema de [X-Calak](#) (1992) representa la mayor instalación que se ha realizado en México bajo la concepción híbrida eólico-fotovoltaica y actualmente es objeto de análisis e investigación por parte de diferentes instituciones y empresas. El equipo de acondicionamiento de potencia, tal como los inversores de corriente, algunos convertidores y los controladores de carga, se encuentran apenas en la etapa de prototipos industriales y poco se ha hecho para caracterizar el comportamiento en campo de las unidades disponibles comercialmente.

De cualquier manera, dado que los sistemas híbridos son por definición centralizados, es decir, proporcionan energía al usuario por medio de una red de distribución; falta definir el conocimiento preciso de las posibles ventajas que puedan presentar en comparación con los sistemas fotovoltaicos dispersos o distribuidos; este es un tema que debe ser analizado más profundamente antes de impulsar su desarrollo.

Potencial eólico

La determinación de la magnitud del recurso energético eólico de un país, en términos de reservas probadas y probables, como capacidad instalable en MW y generación posible en GWh, se realiza siguiendo una metodología semejante a la evaluación del potencial hidroeléctrico de un país. Se requiere de elaborar el inventario de cuencas eólicas y su caracterización, precisando los sitios, su extensión superficial en hectáreas, sus características topográfico eólicas, la rosa de los vientos, vientos energéticos, rumbos dominantes, etc. lo que permitiría configurar la distribución

topográfica de los aerogeneradores, y determinar un índice de capacidad instalable por hectárea, que multiplicado por la superficie total, indicaría la capacidad total instalable en el sitio. La velocidad media del viento en el mismo, sería indicativa del factor de planta posible y por tanto de la generación bruta esperada en GWh/año. Este procedimiento cuantificaría reservas probables, la caracterización detallada, a nivel de estudio de factibilidad, demostraría una reserva probada.

El Consejo para el Desarrollo Sustentable de la Energía en Texas, realizó una evaluación preliminar de sus recursos de energías renovables, y en el caso específico de energía eólica, los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Potencial de producción eléctrica en terrenos ventosos en Texas

Clase de Potencia Eólica	Área (km ²)	Porcentaje de Superficie del Estado	Capacidad Potencial (MW)	Potencial de Producción (TWh)	% del consumo en Texas
3	143,400	21.13%	396,000	860	371%
4	29,700	4.38%	101,600	231	100%
5	5,000	0.74%	21,600	48	21%
6	300	0.04%	1,600	4	2%
Total	178,400	26.29%	524,800	1,143	493%

Fuente: Texas Renewable Energy Resource Assesment. Julio 1995.

Densidad de Potencia en el viento según la clase.

Clase de Potencia Eólica	Densidad de Potencia (W/m ²)	Velocidad media del viento (m/s)	Viabilidad Comercial (Tarifas Actuales)
--------------------------	--	----------------------------------	---

3	300 a 400	6 a 7	Marginal
4	400 a 500	7 a 7.5	Buena
5	500 a 600	7.5 a 8	Muy Buena
6	600 a 800	8 a 8.75	Excelente

Este cuadro limita el inventario a terrenos con ciertas características físicas y cercanos a carreteras y líneas de transmisión eléctrica, no está considerando la totalidad del territorio del Estado. La viabilidad comercial está en relación con costos de generación considerando el nivel de precios internacionales del petróleo y generación termoeléctrica que no contabiliza costos externos. Esta evaluación se realizó, y continúan los estudios a mayor detalle, utilizando la topografía digitalizada del territorio del Estado de Texas (INEGI tiene digitalizado el territorio nacional, disponible en diskettes y disco óptico) y modelos computacionales de dinámica de fluidos, lo que permite simular el flujo del viento sobre los accidentes topográficos de una gran superficie. La información de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional, de los aeropuertos y otras estaciones de medición anemométrica, actuando como datos de entrada, permiten identificar los lugares donde el viento se acelera, por encajonamiento o por el perfil topográfico, originando sitios con alto potencial energético eólico. La cuantificación del recurso, corresponde por tanto a identificar e inventariar los sitios de posible aprovechamiento.

El ejemplo del Estado de Texas muestra que el recurso energético eólico, es mucho más extenso de lo que se puede apreciar empíricamente y del análisis de la información de los Servicios Meteorológicos Nacionales. Estas mediciones son, en general, escasas. Normalmente se realizan en las inmediaciones o el interior de asentamientos humanos importantes, los instrumentos y la metodología de proceso de datos no corresponden a los requisitos de una caracterización eoloenergética ni corresponden a los sitios más ventosos. Esta información subestima el potencial eólico. El valor de la información del Servicio Meteorológico, radica en la caracterización cualitativa del viento en las diferentes regiones de un país, lo que constituye una información indispensable para extrapolar en tiempo y espacio los estudios detallados en lugares de interés, así como para los modelos de simulación.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas inició en 1977 el análisis de la información meteorológica de México para determinar el potencial eólico nacional. Procesar los datos de la década de los 70's , de la información de los 67 observatorios con que contaba el SMN, fue un trabajo conjunto que ocupó varios años y sufrió un importante retraso por el terremoto del 85 que destruyó las computadoras de la Secretaría de Agricultura y las del SMN tuvieron que entrar en su apoyo. Para el SMN digitalizar los registros diarios de las observaciones meteorológicas de la década de los setentas, le llevó casi tres años de trabajo a mediados de los 80's, y al IIE otros tantos en depurar y procesar la información meteorológica del SMN, la que es importante para caracterizar cualitativamente el viento, su estacionalidad, rumbos dominantes, porcentaje de calmas, vientos dominantes y energéticos, pero no así para determinar el potencial energético eólico de un país.



Regiones Eoloenergéticas de México.

El conocimiento del recurso energético eólico en México está a nivel exploratorio y de reconocimiento, sin embargo, las mediciones puntuales o de pequeñas redes anemométricas, realizadas principalmente por el IIE y algunas otras entidades o empresas, han servido para confirmar a nivel de prefactibilidad, la existencia de vientos técnicamente aprovechables y económicamente viables en las siguientes regiones:

*** Sur del Istmo de Tehuantepec.**

Esta región contiene un área del orden de 1000 km. cuadrados expuesta a vientos muy intensos, dado un fenómeno monzónico entre el Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec, donde aflora una corriente marina anormalmente caliente, originando un gradiente térmico y de presión que da lugar a un intenso viento del norte desde el otoño hasta la primavera. Esta región, considerando la infraestructura eléctrica existente y otros usos del suelo podría asimilar una capacidad instalada del orden de los 2000 a 3000 MW, con un factor de planta medio de 0.45. En las zonas más propicias, con factores de planta del 0.6 anual y de 0.9 o más en el otoño e invierno. En las inmediaciones del poblado de La

Venta, Oaxaca, se instaló en 1994 la primera mini central eoloeléctrica en México, con una capacidad de 1,575 kW, constituida por siete aerogeneradores de 225 kW.

****Península de Baja California.***

Esta península es interesante eoloenergéticamente, por varias razones, su extensión geográfica, su baja densidad poblacional y eléctricamente alimentada por sistemas aislados, cuando eolicamente es una barrera natural perpendicular a los vientos occidentales, que en sus montañas e innumerables pasos puede proporcionar muchos sitios con potencial explotable. El poblado de la Rumorosa y zonas aledañas, así como el paso entre la Sierra de Juárez y la Sierra de San Pedro Mártir, por donde cruza la carretera y la línea eléctrica de Ensenada a San Felipe en el Golfo de California, son regiones identificadas con alto potencial eólico, que son indicativas de lo que puede encontrarse en muchos otros lugares de la península.

**** Península de Yucatán.***

La franca exposición de la península a los vientos alisios de primavera y verano, incrementados en su costa oriental por la brisa marina, y a los nortes en el invierno, hacen de Cabo Catoche, la costa de Quintana Roo y el oriente de Cozumel, zonas con potencial eólico interesante, para contribuir significativamente a los requerimientos de la península en apoyo de su generación termoeléctrica.

****Altiplano norte.***

Desde la región central de Zacatecas a la frontera con los Estados Unidos, el norte del país se ve influenciado por la corriente de chorro de octubre a marzo, intensa y persistente, que como viento del poniente al impactar la Sierra Madre Occidental da lugar a innumerables sitios con potencial explotable. En la parte norte del estado de Coahuila existen áreas sumamente ventosas,

****Región Central.***

En la región central del altiplano, prevalecen los vientos alisios de verano, desde Tlaxcala a Guanajuato, que en Pachuca, la bella airosa, son más conocidos. Estos vientos complementan estacionalmente, a los del altiplano norte y los del sur del Istmo de Tehuantepec. La complejidad orográfica de esta región, debe dar lugar a la existencia de innumerables pasos y mesetas donde el viento sea energéticamente aprovechable.

****Las costas del país.***

El extenso litoral mexicano y sus islas, presenta por lo menos condiciones para generación eléctrica en pequeña escala y almacenamiento en baterías, sistemas híbridos diesel-eólicos y en otros generación interconectada. La generación eoloeléctrica en gran escala en las costas para la producción de hidrógeno, constituirá una de las principales aplicaciones a mediados del próximo siglo.

A mediados del próximo siglo, cuando las termoeléctricas a combustóleo y carbón sean historia, y la población en México se estabilice alrededor de los 130 millones de mexicanos, nuestro sistema eléctrico deberá alcanzar del orden de los 125,000 MW instalados, en esas condiciones, la energía eólica podrá contribuir con la generación eléctrica de el orden de 30,000 MW instalados de aerogeneradores, un gran porcentaje de ellos produciendo hidrógeno para centrales turbogas.



Potencial de Aplicación en México.

La asimilación de una tecnología energética emergente corresponde a un proceso político social en el que la correlación de fuerzas se inclina hacia un cambio de paradigma, que hace posible la transición energética. La conciencia de la necesidad de diversificar los energéticos primarios para generación eléctrica, en un contexto de energías renovables, generación distribuida y administración de demanda, apenas empieza a permear en un medio donde las inercias son muy grandes. El sector eléctrico a escala mundial, es muy reticente a introducir cambios y ha sido a través de coacción gubernamental, modificando leyes y reglamentos, e incluso estableciendo sanciones, como se han podido inducir las transformaciones necesarias en el sector eléctrico.

Lo que en este momento se puede esperar, es que dados los graves disturbios climatológicos a escala mundial que se están viviendo como consecuencia del cambio climático originado por actividades humanas, y el sector energético es el principal responsable de ello, se tomen a nivel internacional medidas promocionales a la difusión masiva de tecnologías de generación eléctrica a partir de energías renovables. Si al inicio de próxima década, México arrancara un enérgico programa de desarrollo de centrales eoloeléctricas, podría alcanzarse la cifra de 5000 MW para el 2010, aun así para entonces, más de mitad de la generación eléctrica en México, sería a partir de combustibles fósiles.

Un programa de esta magnitud, en términos de beneficios ambientales, tendría los siguientes efectos: Evitar la instalación de centrales termoeléctricas y por tanto su consumo de agua en el altiplano central para sus sistemas de enfriamiento y las emisiones de gases de efecto invernadero, por otra parte, al no pagar por combustibles, sino por empleos, el desarrollo de centrales eoloeléctricas es lo que más empleos produce dentro del sector energético, beneficiando también a las comunidades donde se asientan, ya que la utilización del suelo interfiere marginalmente con los usos agrícolas o de pastoreo, permitiendo la continuidad de estas actividades y recibándose una renta adicional por el arrendamiento de los espacios y derechos de vía para localizar aerogeneradores, tender líneas de interconexión y subestaciones eléctricas.

En la actualidad se consumen 4 Millones de metros cúbicos de agua de pozo por año en el Valle de México para el enfriamiento de las termoeléctricas, que es más necesaria para dotar servicios de agua potable al menos a 10,000 familias. Las termoeléctricas en Salamanca, San Luis Potosí, Lerdo y Gómez Palacio Dgo. así como en Monterrey, secuestran el agua de pozo que es necesaria para el servicio de agua potable. En conjunto consumieron del orden de 21.35 millones de metros cúbicos en 1994, suficiente para 250,000 habitantes, al haber generado 15,217 GWh.

En conjunto, las Regiones Norte, Noreste y Lerma-Balsas consumieron 105 millones de metros cúbicos de agua en 1994, para una generación termoeléctrica combinada de 97,538 GWh. Este consumo muestra claramente el conflicto actual y la

perspectiva a futuro en las alternativas para el uso de un recurso escaso como el agua, en el altiplano del país.

La generación termoeléctrica bruta con combustibles fósiles, reportada para 1995, fue de 100,698 GWh, en tanto que la de 1994 fue de 107,633 GWh, lo que resulta en un índice de consumo promedio de 1.402915 lts/kWh. De acuerdo a las expectativas, para el año 2000 se tiene el siguiente pronóstico:

Consumo de agua en Centrales Termoeléctricas para el año 2000, en km³

<i>Región</i>	<i>Generación media esperada (GWh/año)</i>	<i>Consumo Subterránea</i>	<i>de Agua Superficial</i>	<i>Dulce Total</i>	<i>Índice lts/kWh</i>
<i>Noroeste</i>	23,187	0,005	0.000	0.005	0.215638
<i>Norte</i>	39,668	0.087	0,022	0.109	2.747807
<i>Noreste</i>	29,329	0.013	0.000	0.013	0.443247
<i>Lerma - Balsas</i>	28,880	0.026	0.000	0.026	0.900277
<i>Valle de México</i>	17,936	0.004	0.000	0.004	0.223015*
<i>Sureste</i>	8,496	0.010	0.000	0.010	1.177024
<i>Totales</i>	147,496	0.145	0.022	0.167	1.132234

**- No considera el uso de 0.057 km³ de aguas residuales, lo que daría un índice de 3.4 lts/kWh, lo que indica enfriamiento con agua que corre.*

El sector eléctrico tiene un crecimiento previsto de 14,097.5 MW termoeléctricos, presumiblemente al año 2010, por sobre los 23,140 MW en operación a finales de 1996. Estas previsiones indican una significativa inercia del Sector, al seguir apoyándose en los combustibles fósiles principalmente para responder al crecimiento de la demanda eléctrica. Esto indica también el rezago tecnológico, por cuanto a la utilización de nuevas tecnologías y el atraso en reglamentar adecuadamente y crear las condiciones propicias para la participación extensiva de los sectores paramunicipales, sociales y privados como permisionarios de generación eléctrica para autoabastecimiento y pequeña producción, así como generación independiente, enfatizando el uso de energías renovables.

De los proyectos mencionados, al menos 4,635 MW están en zonas con problemas actuales de disponibilidad de agua dulce, que para una generación estimada en 24,360 GWh representaría un consumo de agua de 27.3 Millones de metros cúbicos por año adicionales, en conflicto con las necesidades futuras de agua potable en mismas zonas, y que quizá solo fuera posible si se utilizaran aguas residuales en los sistemas de enfriamiento o sistemas de torres secas.

Esta capacidad adicional de termoeléctricas de Ciclo Combinado a gas natural, en zonas críticas por cuanto al suministro de agua de enfriamiento, con tecnologías convencionales, es decir, usando agua dulce de pozo o superficial, es del orden de la capacidad eólica que se estima indispensable desarrollar para diversificar las fuentes de energía primaria, aprovechar renovables y sostener nuestra independencia energética. El desarrollo de al menos 5,000 MW eoloeléctricos al 2010 se considera una meta viable y necesaria.



Escenarios de emisiones evitadas.

Con el fin de establecer un escenario de referencia de contaminantes evitados, consideraremos un factor de planta anual ajustado medio de 0.3, lo cual significa una generación bruta anual de 1,314 GWh por cada 500 MW de capacidad eoloeléctrica instalada. La mitigación resultante se muestra en la siguiente tabla:

Emisiones de CO₂ evitadas por año y acumuladas al 2010 por Generación Eoloeléctrica masiva.

AÑO	Capacidad final MW	Generación Eólica Anual (GWh)*	CO₂ evitado Anual (M ton)	Generación Acumulada (TWh)	CO₂ evitado Acumulado (M ton)
2000	300	657	0.23	0.657	0.23
2001	500	920	0.322	1.577	0.552
2002	1000	1971	0.69	3.548	1.242
2003	1500	3285	1.15	6.833	2.392

2004	2000	4599	1.61	11.432	4.002
2005	2500	5913	2.07	17.345	6.072
2006	3000	7227	2.53	24.572	8.602
2007	3500	8541	2.99	33.113	11.592
2008	4000	9855	3.45	42.968	15.042
2009	4500	11,169	3.91	54.137	18.952
2010	5000	12,483	4.37	66.620	23.322

Se considera un índice de 0.350 Kg./kWh de CO₂, asumiendo desplazamiento de Gas Natural.

** Aunque se considera una inclusión anual de 500 MW, para fines de generación se cuentan 250 MW únicamente.*

*Si consideramos que para el año 2010, más del 50% de la capacidad instalada seguirá siendo de Termoeléctricas, las emisiones evitadas de CO₂ por generación Eoloeléctrica, habrán mitigado el orden de un **sexto** de las emisiones totales por generación termoeléctrica.*

Esta cifra es importante en el contexto de la generación eléctrica nacional, máxime si consideramos el efecto acumulativo de las emisiones de gases de efecto invernadero, y por lo



Resumen de agua dulce y emisiones evitadas por generación eoloeléctrica.

La instalación de 5,000 MW eoloeléctricos al año 2010, instalando a razón de 500 MW por año, implicaría para el 2011 una generación anual de 13,140 GWh de origen eólico, lo que evitaría por año, consumir 17.4 millones de metros cúbicos de agua y lanzar a la atmósfera 4.6 millones de toneladas de CO₂, considerando desplazamiento de gas natural únicamente.

El desarrollo de la capacidad de generación eléctrica con ciclos combinados a base de gas natural, puede ir montando la capacidad instalada para utilizar hidrógeno como

combustible, ya que capacidad adicional de generación eléctrica con energía eólica, solar y oceánica (Olas, maremotriz y de corrientes) dada su naturaleza no despachable e intermitente, si pueden ser ampliamente utilizadas para generar hidrógeno vía procesos electrolíticos, el que bombeado al altiplano será fuente de energía y agua potable. El esfuerzo tecnológico industrial para la instalación de 5000 MW eólicos al año 2010, no terminaría ahí, sino que sentaría las bases para continuar con un mayor énfasis, considerando que el tope de capacidad instalada eoloeléctrica, a mediados del próximo siglo, será del orden de la capacidad total instalada a la fecha en el Sistema Eléctrico Nacional, es decir, alrededor de 30,000 MW.

La apertura del Sector Eléctrico a la participación privada, social, y paramunicipal a la generación eléctrica para autoabastecimiento, cogeneración y pequeña producción independiente, permitirá efectivamente la inclusión masiva del aprovechamiento de fuentes renovables de energía, cuyo carácter difuso y de baja densidad, las hacen adecuadas para las explotaciones distribuidas, orientadas básicamente a la solución de problemas de abasto energético local. Solo la masividad de estos aprovechamientos les puede dar sentido en términos de oferta nacional de energía, y en el caso particular de la energía eólica, sólo la masividad y dispersión de las Centrales Eoloeléctricas integradas al Sistema Nacional Interconectado, puede tener sentido en términos de aportación confiable de energía y capacidad al Sistema Eléctrico Nacional.

Por lo anterior, el escenario de penetración eoloeléctrica a considerar, es el único con racionalidad energética, técnica y económica: el de llevarla al menos, al 10% de la capacidad instalada del Sistema Eléctrico Nacional. Lograr esta penetración para el año 2010, requiere de un esfuerzo extraordinario, tanto industrial para la construcción de partes y componentes, así como de exploración, caracterización y evaluación de sitios de explotación, y finalmente el proyecto, construcción y montaje de Centrales Eoloeléctricas a razón de 500 MW por año, desde el 2002. Esto implica que, de 1998 al 2001, se tomen todas las provisiones legales, reglamentarias, fiscales, financieras, normativas, tarifarias, ambientales, operacionales, institucionales, y fundamentalmente estratégicas y de planeación, para que esto pueda ser posible.








Casos exitosos (Experiencias en México).





Proyectos:

*Desarrollo de los Aerogeneradores Ehecatl de pequeña potencia
 Aerogenerador Fénix
 Instalación demostrativa de un aerogenerador de 250 kW en las salinas de
 Guerrero Negro BCS
 Instalación de un aerogenerador de 600 kW en Guerrero Negro BCS
 Central Eoloeléctrica de la Venta Oaxaca (CFE)
 X-Calak
 Sta. Ma. Magdalena
 El Junco
 La Gruñidora
 Ignacio Allende y El Calabazal
 San Antonio Agua Bendita (LyFC)*

Proyecto:	<i>Desarrollo de los Aerogeneradores Ehecatl de pequeña potencia</i>
Institución Ejecutora:	<i>Ehecatl Mexicana S.A. de C.V. y FIUAEM</i>
Lugar y Fecha de Instalación o Ejecución	<i>Toluca, Estado de México, enero de 1991</i>
Participantes:	<i>Eduardo Rincón Mejía, Rafael Camacho, Fernando Vera, Antonio Moreno, Filiberto Gutiérrez.</i>
Descripción Técnica:	<i>Aerogenerador con turbina tripala de eje horizontal de 5 m de diámetro y perfiles aerodinámicos tipo Warman FX-72 MS-150D. Alternadores y bandas de tipo automotriz y potencia nominal de 1 KW ante vientos de 8 m/s.</i>
Tiempo y estado de operación	
Comentarios	<i>Luego de 4 años de pruebas han sido sustituidos por los aerogeneradores Ehecatl que emplean perfiles aerodinámicos, generadores, sistema de regulación y control, torres, etc. mucho más avanzados, ligeros y económicos. Adaptación tecnológica y desarrollo local</i>
Proyecto:	<i>Aerogenerador Fénix</i>
Institución Ejecutora:	<i>IIE</i>
Lugar y Fecha de	<i>El Gavillero, Hgo de 1987 a 1995</i>

<i>Instalación o Ejecución</i>	
<i>Participantes:</i>	<i>José Luis Briseño, Raúl González, Fortino Mejía, Enrique Caldera y Marco Antonio Borja</i>
<i>Descripción Técnica:</i>	<i>Aerogenerador de 1.5 KW , 3 aspas de fibra de vidrio y generador de imanes permanentes para uso en instalaciones rurales, proporcionando en término medio 250 kWh por mes.</i>
<i>Tiempo y estado de operación</i>	<i>Ha acumulado 5 años,</i>
<i>Comentarios</i>	<i>En suspenso la tercera versión, en proceso de patente y documentación para licenciar la fabricación. Desarrollo y adaptación de tecnología.</i>
	
<i>Proyecto:</i>	<i>Instalación demostrativa de un aerogenerador de 250 kW en las salinas de Guerrero Negro BCS</i>
<i>Institución Ejecutora:</i>	<i>Exportadora de Sal SA de CV y Mitsubishi</i>
<i>Lugar y Fecha de Instalación o Ejecución</i>	<i>Guerrero Negro BCS, 1985</i>
<i>Participantes:</i>	
<i>Descripción Técnica:</i>	<i>Aerogenerador de 250 kW de 30 m de diámetro interconectado al sistema eléctrico de la exportadora de sal, alimentado con generadores diesel.</i>
<i>Tiempo y estado de operación</i>	<i>En forma intermitente por varios años</i>
<i>Comentarios</i>	<i>Tecnología de importación.</i>
	
<i>Proyecto:</i>	<i>Instalación de un aerogenerador de 600 kW en Guerrero Negro BCS</i>
<i>Institución Ejecutora:</i>	<i>CFE</i>
<i>Lugar y Fecha de Instalación o Ejecución</i>	<i>Guerrero Negro BCS, 1998</i>
<i>Participantes:</i>	<i>CFE</i>
<i>Descripción Técnica:</i>	<i>Aerogenerador de 600 kW de 44 m de diámetro en una torre de 50 m de altura</i>
<i>Tiempo y estado de operación</i>	<i>En operación desde diciembre de 1998</i>
<i>Comentarios</i>	<i>Factor de planta igual a 27 %</i>
	
<i>Proyecto:</i>	<i>Central Eoloeléctrica de la Venta Oaxaca</i>

<i>Institución Ejecutora:</i>	<i>CFE</i>
<i>Lugar y Fecha de Instalación o Ejecución</i>	<i>La Venta Oaxaca, 1994</i>
<i>Participantes:</i>	<i>Subdirección de Construcción y empresas contratistas</i>
<i>Descripción Técnica:</i>	<i>Central eoloeléctrica formada por 7 aerogeneradores daneses Vestas de 225 kW con rotores de 27 m de diámetro, totalizando una capacidad de 1575 kW. Interconectada al circuito de distribución que alimenta a este poblado y otros aledaños.</i>
<i>Tiempo y estado de operación</i>	<i>En operación continua desde julio de 1994</i>
<i>Comentarios</i>	<i>Tecnología extranjera con participación de mano de obra local</i>
	
Proyecto:	X-Calak
<i>Institución Ejecutora:</i>	<i>Gobierno del Estado de Q. Roo, Condumex</i>
<i>Lugar y Fecha de Instalación o Ejecución</i>	<i>X-Calak, Othón P. Blanco, Quintana Roo. 1992</i>
<i>Participantes:</i>	<i>Arturo Romero Paredes, Enrique Hill, Teófilo Delarbre</i>
<i>Descripción Técnica:</i>	<i>Sistema Híbrido formado por 60 KW de generador eólicos, 11.2 KW fotovoltaicos y un generador diesel de 125 kVA</i>
<i>Tiempo y estado de operación</i>	<i>En operación continua desde 1992</i>
<i>Comentarios</i>	<i>El sistema abastece de energía eléctrica a todo el poblado. Fue instrumentado en 1993 mediante un convenio de colaboración entre Condumex, IIE y los laboratorios de Sandia NM. Tecnología extranjera con integración de componentes de desarrollo nacional</i>
	
Proyecto:	Sta. Ma. Magdalena
<i>Institución Ejecutora:</i>	<i>Westinghouse IPC</i>
<i>Lugar y Fecha de Instalación o Ejecución</i>	<i>Actopan, Hidalgo, 1991</i>
<i>Participantes:</i>	
<i>Descripción Técnica:</i>	<i>Sistema Híbrido: 4.32 kW fotovoltaicos, 5 kW eólicos y 18.4 kW con generador diesel.</i>
<i>Tiempo y estado de operación</i>	
<i>Comentarios</i>	<i>Cuenta con equipo electrónico para la adquisición de datos.</i>

	
Proyecto:	<i>El Junco</i>
<i>Institución Ejecutora:</i>	<i>Entec, S.A. de C.V.</i>
<i>Lugar y Fecha de Instalación o Ejecución</i>	<i>Mazapil, Zacatecas, 1992</i>
<i>Participantes:</i>	<i>Arturo Whaley, Victor Tamayo</i>
<i>Descripción Técnica:</i>	<i>Sistema híbrido: 1.6 kW fotovoltaicos y 10 kW eólicos.</i>
<i>Tiempo y estado de operación</i>	<i>En operación continua desde su instalación</i>
	
Proyecto:	<i>La Gruñidora</i>
<i>Institución Ejecutora:</i>	<i>Entec, S.A. de C.V.</i>
<i>Lugar y Fecha de Instalación o Ejecución</i>	<i>Mazapil, Zacatecas</i>
<i>Participantes:</i>	<i>Arturo Whaley, Victor Tamayo</i>
<i>Descripción Técnica:</i>	<i>Sistema híbrido: 1.2 kW fotovoltaicos y 10 kW eólicos</i>
<i>Tiempo y estado de operación</i>	<i>En operación desde su instalación</i>
<i>Comentarios</i>	
	
Proyecto:	<i>Ignacio Allende y El Calabazal</i>
<i>Institución Ejecutora:</i>	<i>Entec, S.A. de C.V.</i>
<i>Lugar y Fecha de Instalación o Ejecución</i>	<i>Mazapil, Zacatecas</i>
<i>Participantes:</i>	<i>Arturo Whaley, Victor Tamayo</i>
<i>Descripción Técnica:</i>	<i>Sistema híbrido: 0.8 kW fotovoltaicos y 10 kW eólicos</i>
<i>Tiempo y estado de operación</i>	<i>En operación desde su instalación</i>
<i>Comentarios</i>	
	
Proyecto:	<i>San Antonio Agua Bendita</i>
<i>Institución Ejecutora:</i>	<i>Westinhouse e IPC para Luz y Fuerza del Centro</i>
<i>Lugar y Fecha de Instalación o Ejecución</i>	<i>Tenancingo, Mex, 1993</i>
<i>Participantes:</i>	<i>Jesús Garduño, Alfonso Reyes, Jorge Gutiérrez Vera.</i>
<i>Descripción Técnica:</i>	<i>Sistema Híbrido: 12.4 kW fotovoltaicos, 20 kW eólicos y 40</i>

	<i>kW diesel</i>
<i>Tiempo y estado de operación</i>	<i>En operación desde su instalación</i>
<i>Comentarios :</i>	<i>En proceso de instrumentación.</i>